

Диссертационная работа  
«Исследование радиоисточников и  
крупномасштабной структуры  
солнечного ветра по наблюдениям  
межпланетных мерцаний вблизи  
минимума и в фазе роста 23/24 цикла  
солнечной активности»

А. В. Глянцев

## Параметры радиотелескопа БСА на момент наблюдений, положенных в основу диссертации

- Центральная частота: 111 МГц
- Полоса пропускания: 600 кГц
- Диаграмма направленности неподвижна относительно Земли, и сканирование неба происходит за счет суточного вращения
- Диаграмма направленности имеет 16 лучей, покрывающих полосу шириной около 8 градусов по склонению.
- Частота опроса 10 Гц

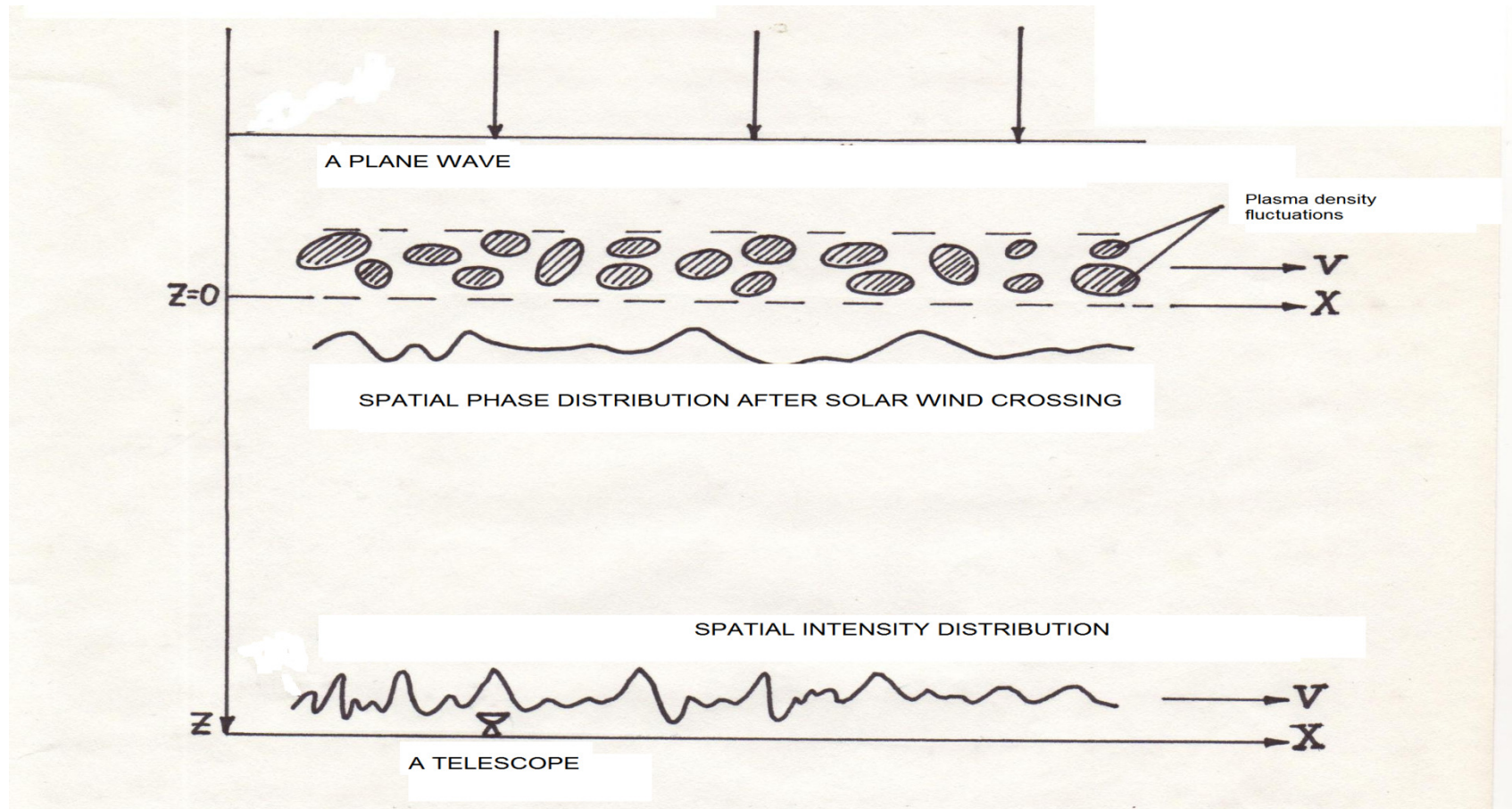


# Что такое мерцания?

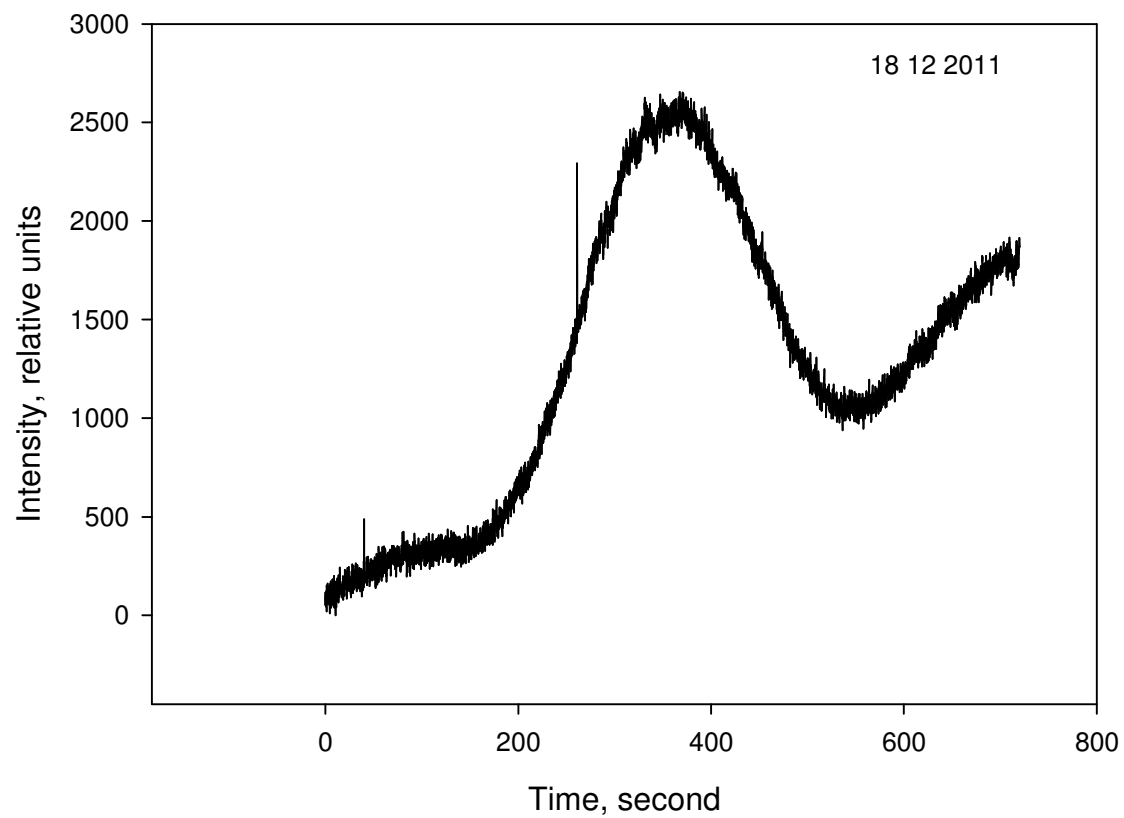
Радиоволны от космических радиоисточников распространяются через турбулентную межпланетную плазму.

Из-за дифракции на флуктуациях показателя преломления (плотности плазмы) возникает пространственная дифракционная картина, которая движется относительно луча зрения вместе с солнечным ветром. Таким образом, радиотелескоп попадает поочередно то в минимум, то в максимум дифракционной картины. Типичный период мерцаний  $\sim 1$  с для метрового диапазона волн.

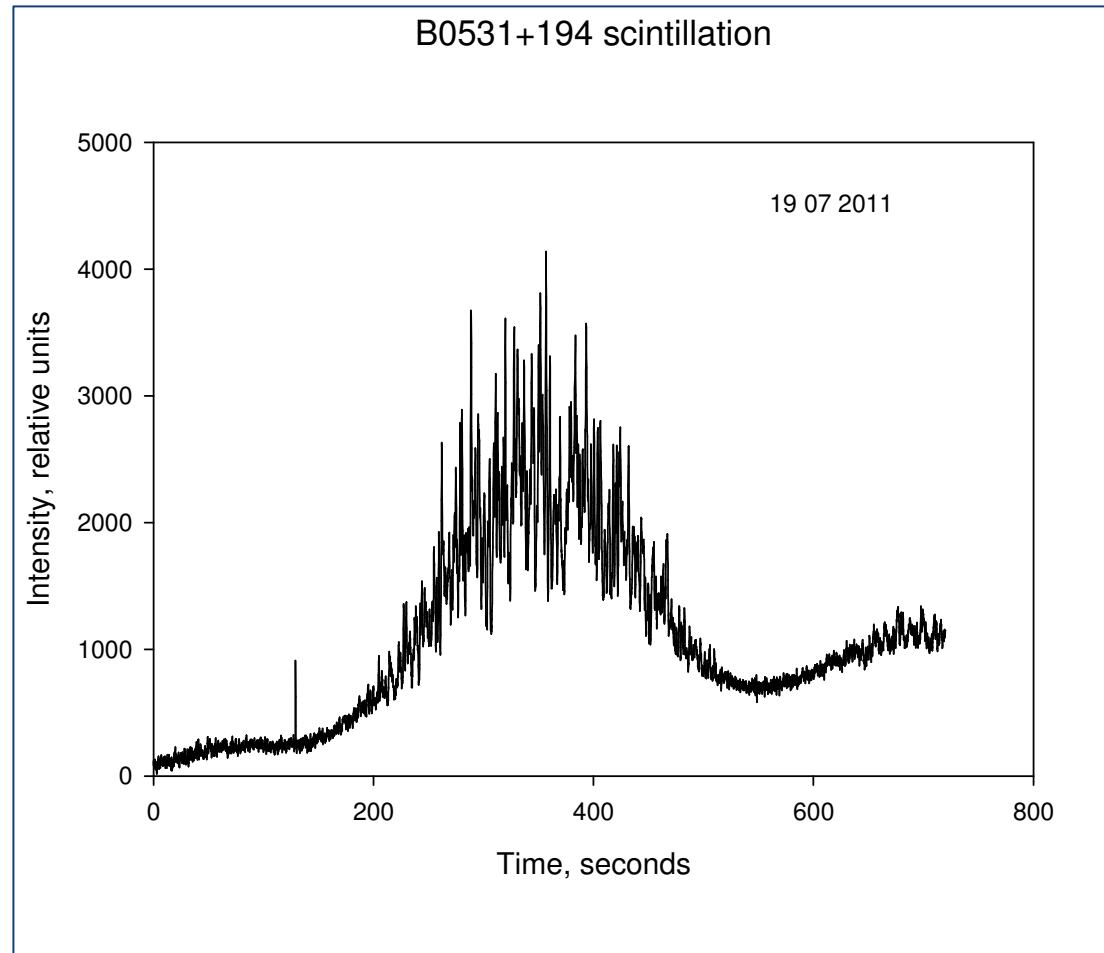
# Механизм мерцаний



# V0531+194 без мерцаний



# Мерцания B0531+194



# Уровень мерцаний зависит от

- Углового размера источника (мерцают только компактные)
- Дисперсии концентрации плазмы на масштабе порядка Френелевского. Обычно предполагают, что дисперсия концентрации прямо пропорциональна среднему значению концентрации. Плотность плазмы сформировавшегося солнечного ветра падает с удалением от Солнца как  $1/R^2$ . Поэтому максимальный вклад в мерцания для сферически симметричного солнечного ветра вносят наиболее близкие к Солнцу слои плазмы.



# Индекс мерцаний

- Традиционная характеристика уровня мерцаний – индекс мерцаний – среднеквадратичное значение флуктуаций интенсивности принятого сигнала, нормированное на среднее значение.

$$m^2 = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}$$

- Он удобен тем, что представляет собой относительную величину – для его вычисления не нужно знать цену деления, т.к. она входит в качестве множителя в числитель и знаменатель.

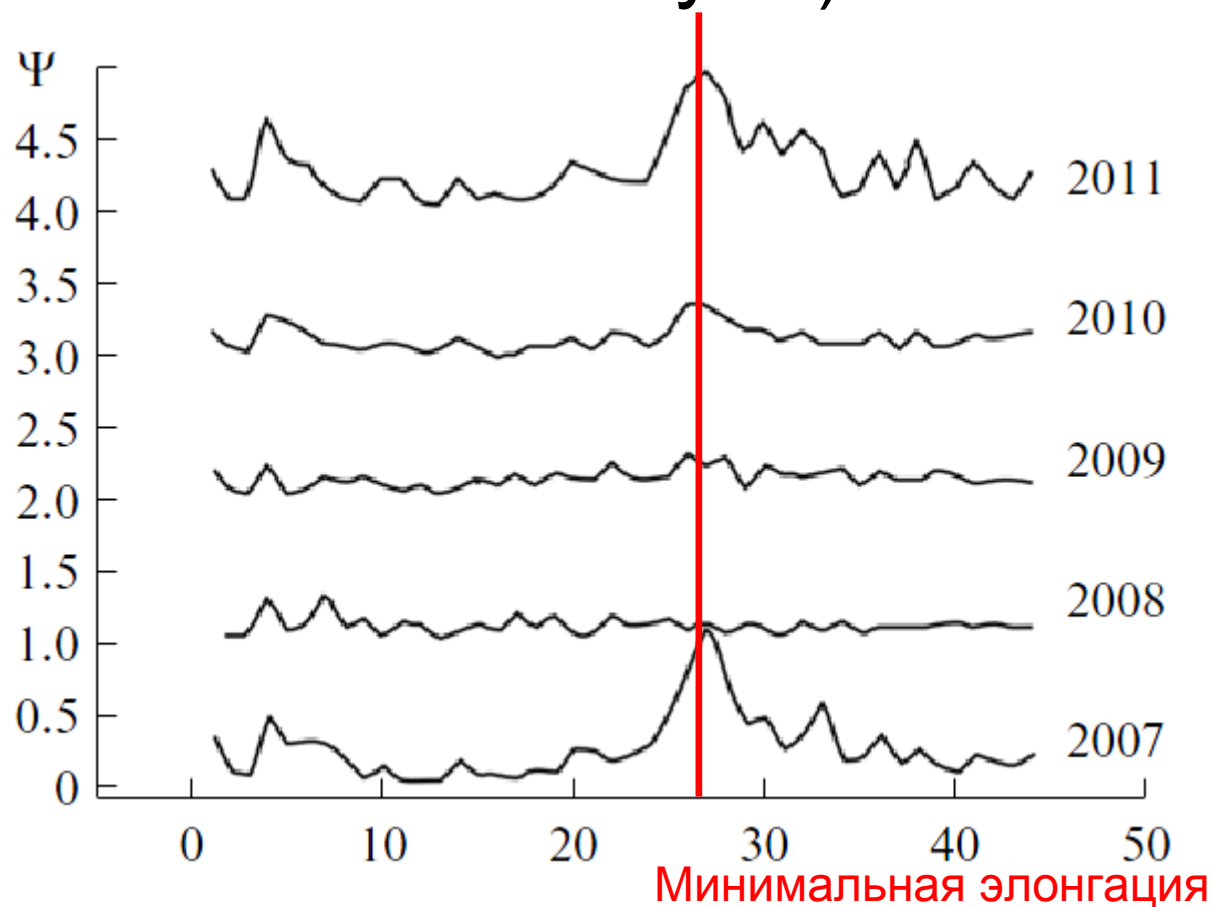
## 1. Мерцания ансамбля слабых источников (выносятся на защиту)

Для подавляющего большинства слабых источников, наблюдаемых на высокочувствительном радиотелескопе БСА ФИАН, отсутствует информация об угловой структуре, что затрудняет получение информации о параметрах солнечного ветра. Поэтому в последние годы была разработана методика обработки, основанная на предположении, что популяция мерцающих источников представляет собой однородный статистический ансамбль (Шишов и др., 2008). При этом уровень мерцаний оценивается не для отдельных источников, а для частей ансамбля, попадающих на равные площадки небесной сферы, находящиеся на различных расстояниях от Солнца.

# Наблюдение статистического ансамбля радиоисточников в 2007-2011 гг.

Наблюдаемая радиотелескопом за сутки область неба была поделена на 45 площадок  $8^\circ \times 8^\circ$ , каждая наблюдалась 32 минуты в сутки. В площадке находится несколько десятков радиоисточников с флуктуациями плотностью потока от 0.2 Ян. Оценивалась величина  $\Psi \propto N(\sigma_{IPS} > 0.2 \text{ Ян}) \propto \langle m^2 \rangle$ , имеющая смысл интегральной дисперсии мерцающего потока.

# Распределение уровня мерцаний по площадкам в 2007-2011 гг. на примере февраля. 1 точка = 1 площадка (32 минуты)



# Влияние гелиосферного токового слоя

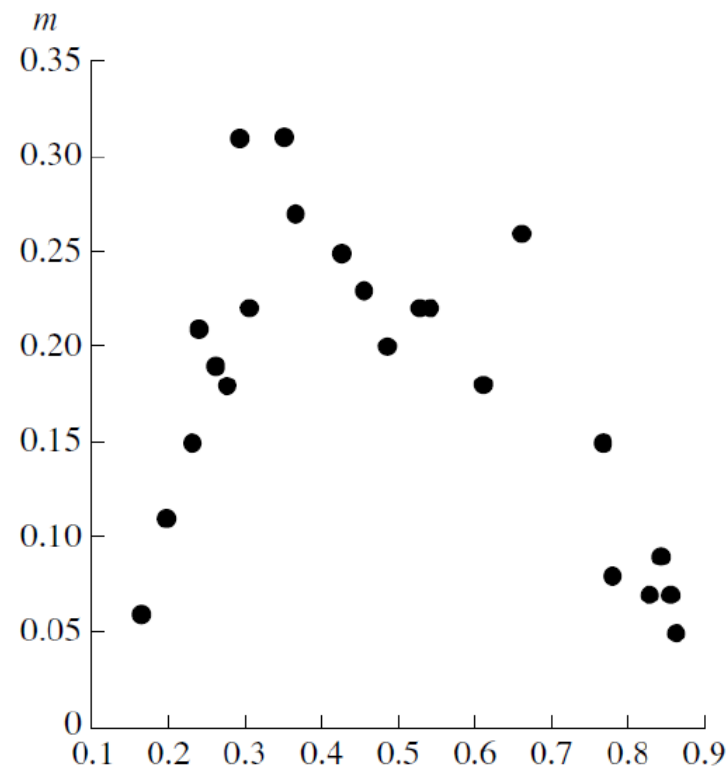
- Данные 2007 и 2011 гг. обнаруживают сильную зависимость уровня мерцаний от элонгации, что качественно согласуется со сферически-симметричной моделью солнечного ветра. Для данных 2008-2010 гг. зависимость от расстояния до Солнца (времени суток) практически отсутствует. Ослабление зависимости можно объяснить влиянием гелиосферного токового слоя с повышенной плотностью плазмы, который разделяет области с противоположной полярностью межпланетного магнитного поля. Вблизи минимума солнечной активности слой вносит в мерцания вклад, превосходящий вклад окрестности прицельной точки.

## 2. Оценка углового размера источника по наблюдениям насыщенных мерцаний (выносится на защиту)

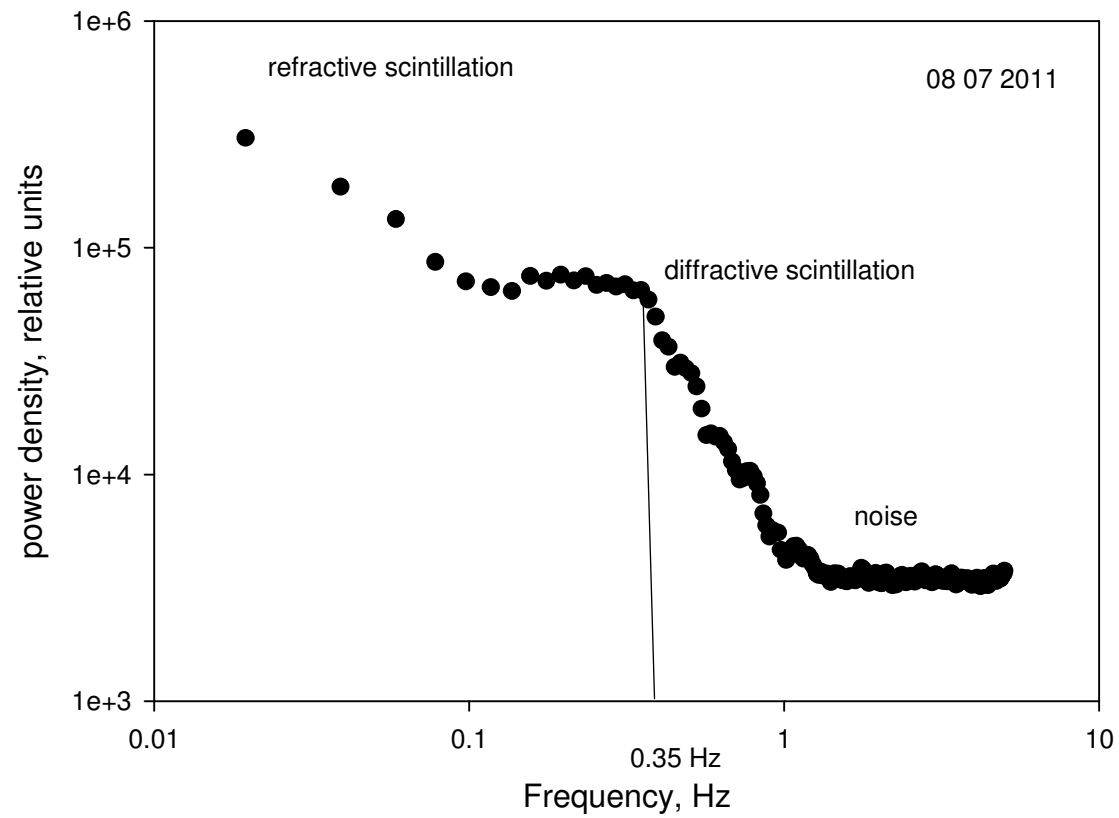
- Впервые применен метод оценки углового размера мерцающего компонента космического радиоисточника, основанный на измерениях частоты излома в дифракционной части спектра мощности мерцаний в области насыщения. Метод опробован на источнике B0531+194 по наблюдениям за июль 2011 г.
- В области насыщения спектр мерцаний состоит из двух частей: низкочастотной – рефракционные мерцания, и высокочастотной - дифракционные мерцания.
- Для точечного источника, как известно из теории, характерная частота дифракционных мерцаний увеличивается при сближении лучевой линии с Солнцем.

# Слабые и насыщенные мерцания

Индекс мерцаний источника В0531+194 в зависимости от синуса элонгации 23 июня – 31 августа 2011 г.

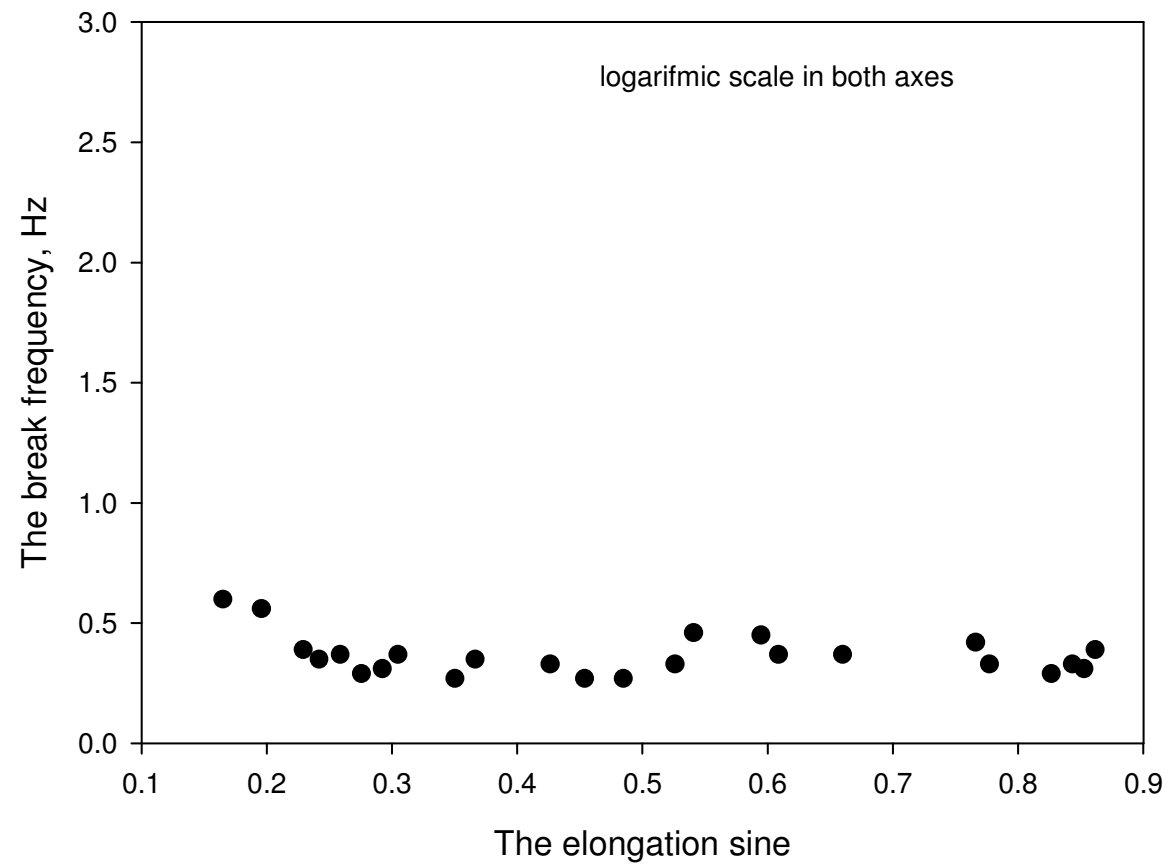


# Пример спектра мощности мерцаний





# Зависимость частоты излома спектра мощности мерцаний V0531+194 от элонгации



# Оценка углового размера по частоте излома

$$f_b = V / (2\pi \theta_0 * 1 \text{ а. у. } \cos \varepsilon),$$

- здесь  $f_b$  частота излома,  $v$  - скорость солнечного ветра,  $\theta_0$  - угловой размер источника,  $\varepsilon$  - элонгация.
- Угловой размер В0531+194 оценен как  $0''.24 \pm 0''.05$ , что согласуется с данными других авторов.

### 3. Детектирование выбросов корональной массы по наблюдениям мерцаний (выносятся на защиту)

Выбросы корональной массы (coronal mass ejections, CME) - это выбросы вещества солнечной короны массой  $\sim 10^{15}$  г, которые обычно связаны с солнечными вспышками. Их приход на Землю может вызывать магнитные бури. Плазма фронта CME более плотная и более турбулентная, чем плазма окружающего солнечного ветра. Поэтому, попадая на луч зрения, CME вызывает всплеск мерцаний.

# Отслеживание выбросов корональной массы по всплескам мерцаний

- В годичной серии наблюдений с июня 2011 по июль 2012 г. сопоставлялись:
  1. поведение индексов мерцаний
  2. всплески рентгеновского излучения Солнца
  3. Возмущения геомагнитного поля (падение индекса Dst)

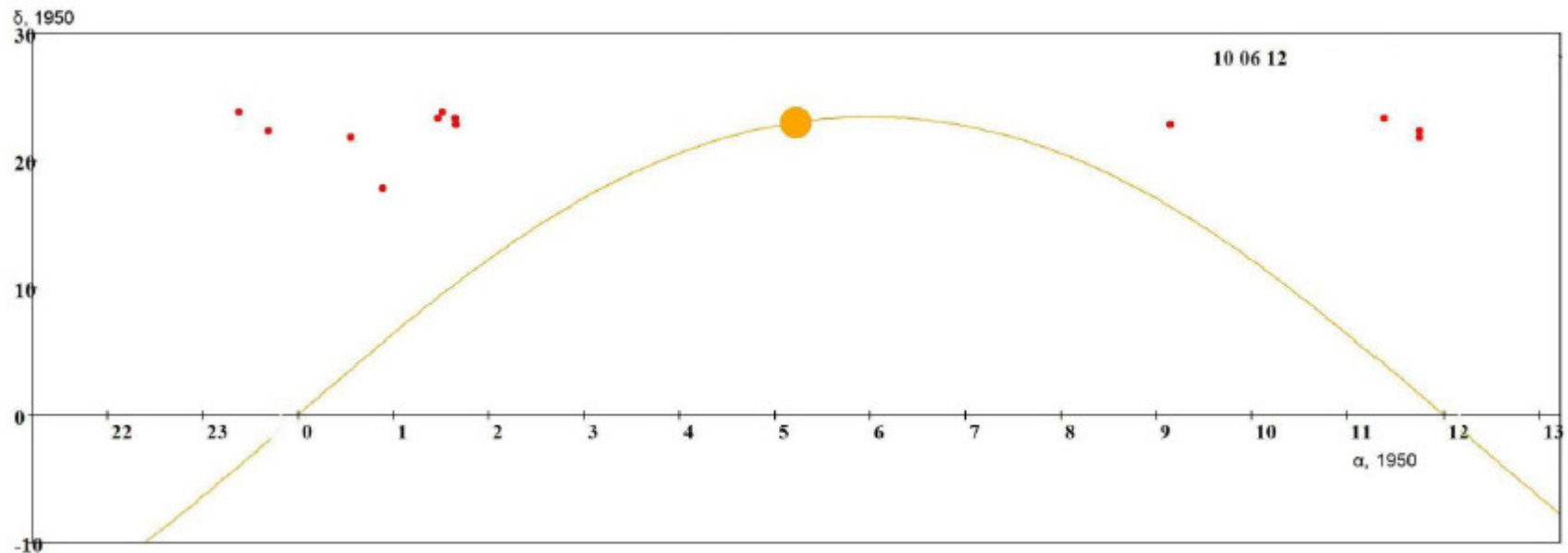
# Критерии отбора

- Считалось, что событие заслуживает внимания, если выполнено хотя бы одно из условий:
- 1. В солнечной короне произошла рентгеновская вспышка класса не ниже M5.0
- 2. Не менее 5 источников увеличили индекс мерцаний по сравнению с предыдущим днем в 1.5 раза и более.
- 3. Геомагнитный индекс Dst (магнитное поле экваториального кольцевого тока в магнитосфере Земли, в невозмущенных условиях равен нулю) упал до -50 nT и ниже.

# Критерии отбора

- После регистрации значимого события хотя бы одним из трех способов необходимо решить, какими еще способами зарегистрировано это событие. Если значимое событие обнаруживалось по критерию Dst или мерцаний, при поиске связанных с ним рентгеновских вспышек просматривались вспышки класса M1.0 и выше. Если значимое событие обнаруживалось по критерию рентгеновских вспышек или мерцаний, при поиске связанных с ним падений Dst учитывались падения от  $-20$  nT и ниже.

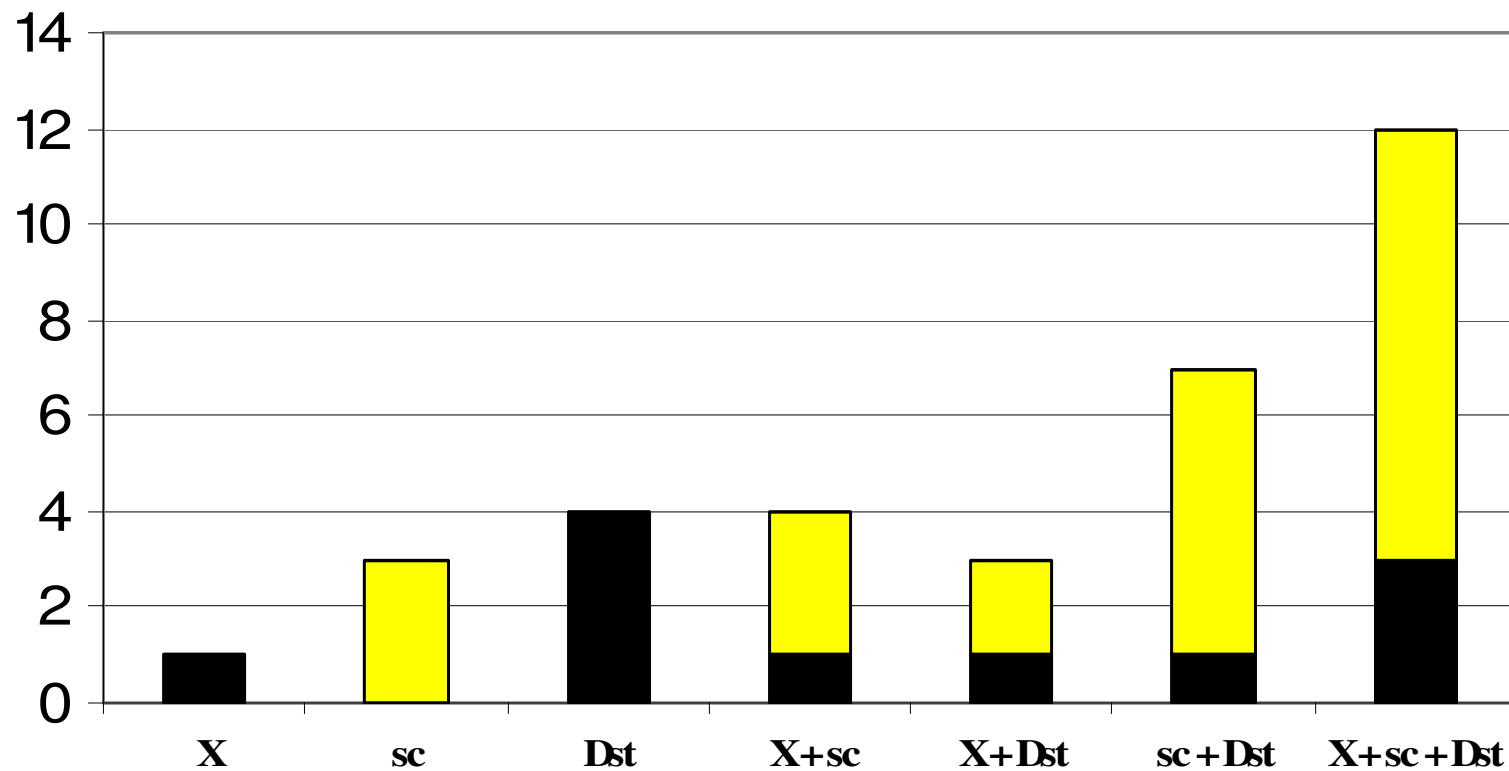
# Пример всплеска мерцаний



Источники, индекс мерцаний которых изменился более чем в 1.5 раза — 12 точек на карте. Симметричное расположение относительно Солнца (большой кружок) говорит о том, что возмущение направлено на Землю.

Это возмущение от Солнца зафиксировано в мерцаниях 10 июня 2012 г.

Анализ событий за июнь 2011 – июль 2012 гг.  
(светлым обозначены надежно  
зафиксированные события, темным –  
ненадежно зафиксированные)





# Анализ событий за июнь 2011 – июль 2012 г.

- \* Нет ни одного надежно зафиксированного случая, когда наблюдалась только рентгеновская вспышка или только падение Dst. Во всех таких случаях наблюдения были затруднены, так что мог иметь место и всплеск мерцаний. Будем далее рассматривать только надежно обнаруженные события.
- Имеются три случая, когда всплеск мерцаний не сопровождался ни рентгеновской вспышкой, ни падением Dst. Такой всплеск мерцаний может быть вызван, например, областью взаимодействия потоков быстрого и медленного солнечного ветра (corotating interaction region, CIR).
- Три события, когда рентгеновская вспышка сопровождалась всплеском мерцаний, но не падением Dst, могли быть вызваны CME, не вызвавшими геомагнитных возмущений из-за ориентации своего магнитного поля.
- Имеется два случая, когда вспышка сопровождалась падением Dst, но не всплеском мерцаний.

# Анализ событий за июнь 2011 – июль 2012 г.

- Имеется шесть случаев, когда всплеск мерцаний сопровождался падением Dst, но не рентгеновской вспышкой. Они могут быть связаны с безвспышечными CME, либо CIRs в районе Земли.
- Девять событий, зарегистрированных всеми тремя способами одновременно, можно достаточно уверенно классифицировать как достигшие Земли CME.

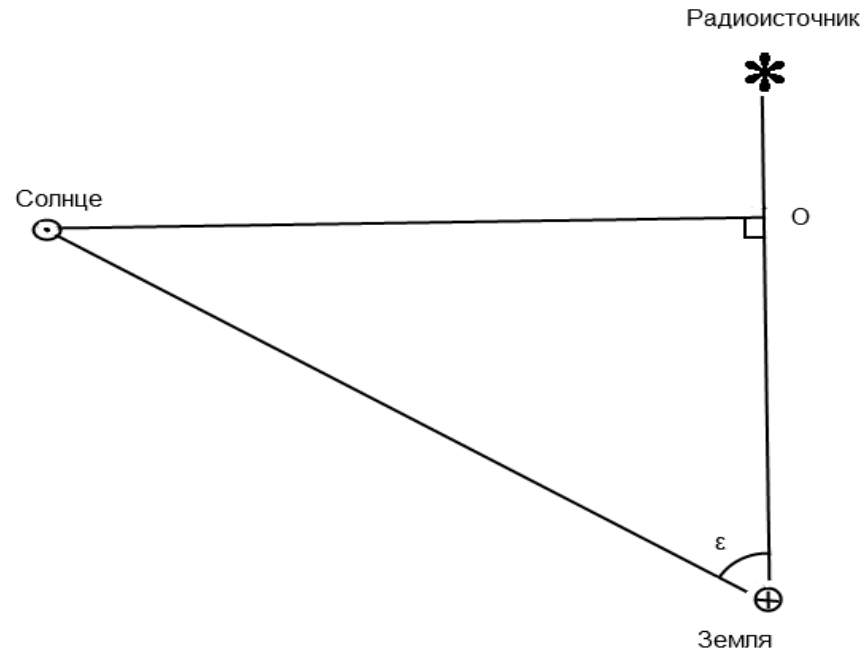
## Вывод

- Если за вспышкой на Солнце следует возмущение магнитного поля Земли, то в 75% случаев наблюдаются заметные повышения уровня мерцаний. Это означает, что метод мерцаний позволяет отследить большую часть крупномасштабных возмущений в межпланетной плазме.

## 4. Оценка скоростей возмущений (выносятся на защиту)

- Скорость оценивается по промежутку времени между вспышкой, предположительно, ассоциированной с выбросом, и всплеском мерцаний радиоисточника.

# Схема, иллюстрирующая взаимное расположение Земли, Солнца и радиосточника



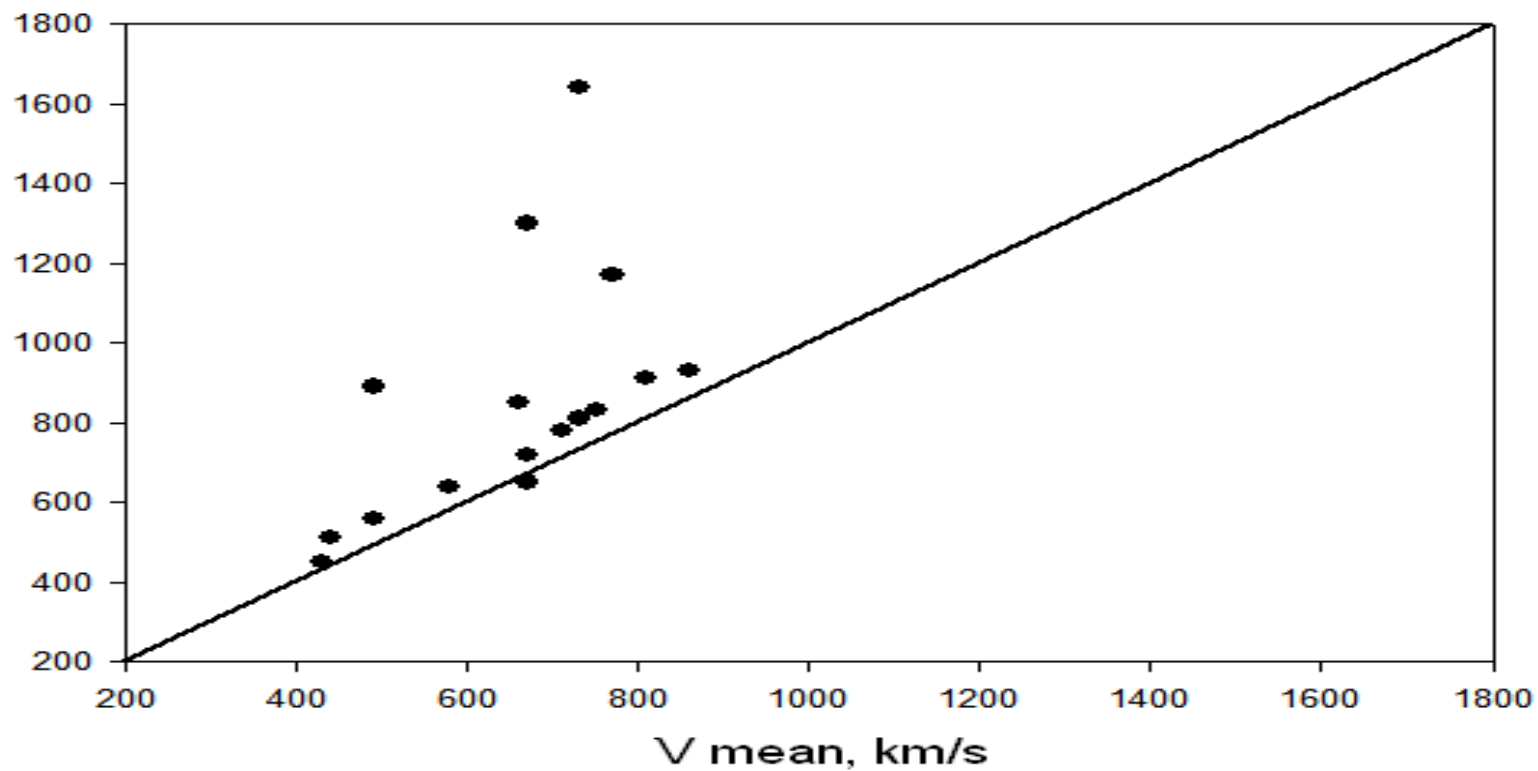
$$V \geq V_{x-sc} = (1 \text{ а.е.} * \sin \epsilon) / (t_{csint} - t_{Sun})$$

# Результаты

- для шести из девяти событий оценка скорости отличается от средней скорости возмущения не более чем на 16%, что обеспечивает точность прогноза прихода выброса на Землю не хуже, чем 10-15 ч.

# Сравнение оценки $V_{X-SC}$ со средней скоростью возмущения между Солнцем и Землей

$V_{X-SC}$ , km/s



# На защиту выносятся результаты

- 1. Для периода вблизи минимума солнечной активности обнаружено ослабление радиальной зависимости уровня мерцаний статистического ансамбля из нескольких сотен слабых мерцающих радиоисточников. Это ослабление интерпретировано как влияние гелиосферного токового слоя.
- 2. Впервые применен метод оценки углового размера мерцающего компонента космического радиоисточника, основанный на измерениях частоты излома в дифракционной части спектра мощности насыщенных мерцаний. Такая оценка, проведенная для источника V0531+194, хорошо согласуется с известными из литературы данными об угловом размере источника на других частотах.



# На защиту выносятся результаты

- 3. Рассмотрена корреляция всплесков рентгеновского излучения Солнца, всплесков мерцаний космических радиоисточников на межпланетной плазме и возмущений геомагнитного поля в годичной серии наблюдений 2011-2012 гг. Показано, что, если за вспышкой на Солнце следует возмущение магнитного поля Земли, то в 75% наблюдаются заметные повышения уровня мерцаний. Это означает, что метод мерцаний позволяет отследить большую часть крупномасштабных возмущений в межпланетной плазме.

# На защиту выносятся результаты

4. Оценены скорости обнаруженных возмущений, достигших Земли. В двух третях случаев оценка скорости, полученная по наблюдениям мерцаний, отличается от средней скорости возмущения между Солнцем и Землей не более чем на 16%. Это показывает, что наблюдения мерцаний позволяют оценивать скорость возмущений и время их прихода к Земле.

# Личный вклад диссертанта

Во всех результатах, выносимых на защиту, вклад соискателя является определяющим. Соискатель совместно с соавторами участвовал в постановке задач и формулировке выводов работы. Выделение вклада мерцающих источников из предварительно обработанного сигнала, оценка индекса мерцаний, детектирование всплесков мерцаний, оценка скоростей выбросов корональной массы и т.д. выполнены компьютерными программами, написанными на языке C# лично соискателем. Визуальный контроль качества наблюдений осуществлен лично соискателем. Метод оценки углового размера источника по наблюдениям насыщенных мерцаний предложен соискателем совместно с научным руководителем, расчеты по оценке этим методом углового размера источника B0531+194 проведены лично соискателем. Постановка задач, формулировка выводов и подготовка полученных результатов к публикации проводилась соискателем совместно с соавторами.

# Список публикаций

- Изложенные в диссертации результаты опубликованы в 17 работах, включая 7 публикаций в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ. Результаты работы апробированы на 15 конференциях, включая 6 международных.

# Список публикаций (полужирным шрифтом выделены публикации в журналах из списка ВАК)

- 1. Бутенко А. В., Глянцев А. В. Калибровка наблюдений в обзоре источников на антенне БСА. VII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 2010, с. 17.
- 2. Бутенко А. В. Глянцев А. В. Поиск кандидатов в гигантские радиогалактики. XVI Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых, Волгоград, 2010, с. 376.
- 3. Tyul'bashev S. A., Glyantsev A. V., Butenko A. V. The search of giant radio galaxies at declinations from 3 to 12 degrees. The XI Russian-Finish Radio Astronomy Symposium «Multi-Wavelength Investigation of Solar and Stellar Activity, and the Properties of Active Galactic Nuclei», Pushchino, 2010, p. 30.
- **4. Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Межпланетные мерцания сильных радиоисточников на фазе спада вблизи минимума 23-го цикла солнечной активности. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т. 51. С. 1-6.**
- 5. Glyantsev A. The interplanetary scintillation of the power scintillation sources in the decreasing phase near the minimum of solar activity cycle 23. The 41st Young European Radio Astronomers Conference, Manchester, 2011, p. 3.
- 6. Glubokova S., Glyantsev A. V., Tyul'bashev S. A., Chashei I. V., Shishov V. I. Results of interplanetary scintillation observations of strong radio sources in the decline and minimum phases of cycle 23 of solar activity. 19th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv, 2012, p. 60.
- 7. Glyantsev A. The refractive and diffractive scintillation of the source B0531+194. The 42nd Young European Radio Astronomers Conference, Pushchino, 2012, p. 7.
- **8. Чашей И. В., Шишов В. И., Тюльбашев С. А., Глянцев А. В., Субаев И. А. Межпланетные мерцания ансамбля радиоисточников в период минимума 23/24 цикла солнечной активности. // Космические исследования. 2013. Т. 51. С. 28–34.**
- **9. Бутенко А. В. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А. Кандидаты в гигантские радиогалактики на склонениях от 3.5° до 12°. // Астрономический журнал. 2013. Т. 90. С. 3–9.**

# Список публикаций (полужирным шрифтом выделены публикации в журналах из списка ВАК)

- **10. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. О возможности определения угловых размеров источников по наблюдениям межпланетных мерцаний в режиме насыщения. // *Астрономический журнал*. 2013. Т. 90. С. 557–564.**
- 11. Тюльбашев С. А., Глянцев А. В., Чашей И. В., Шишов В. И., Орешко В. В. Наблюдения мерцающих источников на модернизированном радиотелескопе БСА ФИАН. Всероссийская конференция по солнечно-земной физике, посвящённая 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В. Е. Степанова, Иркутск, 2013, с. 256.
- **12. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. О детектировании выбросов корональной массы в межпланетной среде по наблюдениям мерцаний радиоисточников. // *Астрономический журнал*. 2014. Т. 91. С. 713-719.**
- 13. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А. Программа обработки наблюдательных данных модернизированного телескопа БСА ФИАН. Всероссийская радиоастрономическая конференция (ВРК-2014) «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии», Пущино, 2014, с. 121.
- **14. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Наблюдения выбросов корональной массы методом межпланетных мерцаний вблизи максимума 24-го цикла солнечной активности. // *Астрономический журнал*. 2015. Т. 92. С. 46-52.**
- 15. Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 на радиотелескопе БСА ФИАН. V Пулковская молодежная астрономическая конференция, Санкт-Петербург, 2014, с. 19.
- 16. Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Детектирование и оценка скоростей выбросов корональной массы по наблюдениям мерцаний радиоисточников. V Пулковская молодежная астрономическая конференция, Санкт-Петербург, 2014, с. 20.
- **17. Глубокова С. К., Глянцев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазаров 3С 48 и 3С 298 в период максимума солнечной активности. // *Астрономический журнал*. 2015. Т. 92. С. 38-45.**

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**